

固体壁近傍の予混合火焰の安定性について

その他（別言語等） のタイトル	On the Stability of Premixing Flame in the Neighbour of Solid Wall
著者	澤 則弘, 林 重信
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	6
号	2
ページ	467-476
発行年	1968-07-20
URL	http://hdl.handle.net/10258/3433

固体壁近傍の予混合火焰の安定性について

澤 則 弘*・林 重 信

On the Stability of Premixing Flame in the Neighbour of Solid Wall

Norihiro Sawa and Shigenobu Hayashi

Abstract

To examine in detail the effects of solid wall on the characteristic and construction of combustion flame, we provided the flat flame burner with porous port, which was designed to provide a practical approach to the ideal condition for the study of laminar flame propagation. And we made a flat flame taking use of this flat flame burner, and measured experimentally the lift, the length and the temperature of flame, and sketched out the construction of flame.

Consequently, it is ascertained that the stability and lift of flame depend mainly on the amount of mixture flow, mixture ratio and the velocity of side air flow.

I. 緒 言

内燃機関のシリンダ内表面温度は、燃焼ガス温度よりもかなり低い状態に保たれている。このためシリンダ壁面の近傍では燃焼が完了せず、未燃ガスの生成や火炎の吹消え現象などが起こっている。かかる現象は、エネルギー変換過程においても好ましくないことはいうまでもなく、公害問題として注目されている炭化水素や一酸化炭素の排出の原因ともなる。したがって、壁面近傍における燃焼現象を解明することは重要な意義をもつものである。

冷却壁の火炎に対する作用は、火炎と壁面との距離、すなわち消炎距離によって論ずることができ、坑道における爆発の防止という目的から数多くの研究¹⁾がおこなわれてきた。この消炎距離と燃焼条件との関係は火炎の構造を解明する重要な手掛りとなり、火炎の性質を知することは各種燃焼器における火炎の安定性を予想し、また燃焼器を設計するうえにも有力な指針を与えるものである。かかる観点から、まず一次元の平らな板状火炎を金属粉末を焼結した多孔板を応用して作り出し、かかる火炎構造におよぼす壁面温度、混合気流量、混合比、横風流速および横風温度の影響について実験的に調べたのでここに報告する。

II. 実験装置および方法

実験装置の系統図を図-1に、写真を図-2に、さらに燃焼器のバーナー部分を図-3に示

* 茨城大学工学部教授

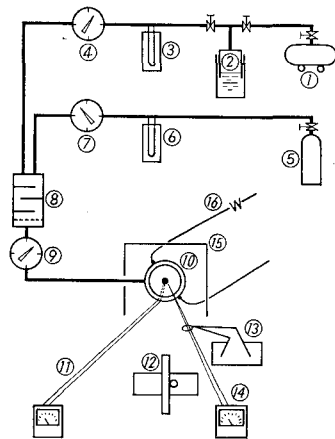


図-1(a) 実験装置

- | | |
|-------------|----------------|
| ① コンプレッサー | ⑨ ガスメーター |
| ② 脈動鎮静タンク | ⑩ 燃 焼 器 |
| ③ マノメーター | ⑪ アルメル・クロメル熱電対 |
| ④ ガスメーター | ⑫ 読取り望遠鏡 |
| ⑤ プロパンガスボンベ | ⑬ 三次元微動移動装置 |
| ⑥ マノメーター | ⑭ 白金・白金ロジウム熱電対 |
| ⑦ ガスメーター | ⑮ つ い 立 |
| ⑧ 混 合 器 | ⑯ 冷 却 水 |

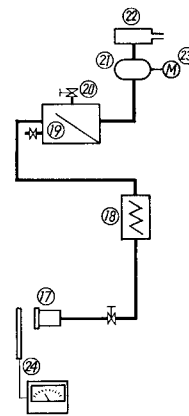
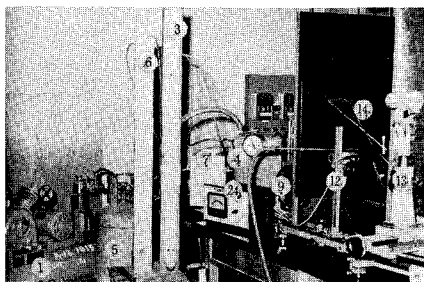
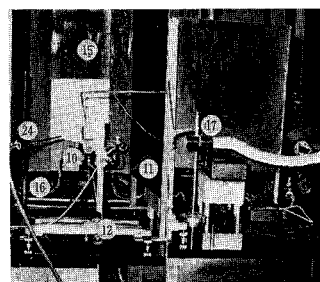


図-1(b) 横風供給装置

- | |
|-------------|
| ⑬ 横風送風器 |
| ⑭ 熱風発生器 |
| ⑮ 脈動鎮静分配タンク |
| ⑯ スルース弁 |
| ⑰ ルーツプロア |
| ⑱ クリーナー消音器 |
| ⑲ 駆動モーター |
| ⑳ サーミスタ流速計 |



(a)



(b)

図-2 実験装置

す。図において燃焼用空気は空気圧縮機 ① から脈動鎮静および一定圧調整用のタンク ② を経て、絞り流量計 ③ およびガスメーター ④ で計量され混合室 ⑧ に送入される。同様に燃料 (L.P.G.) は燃料タンク ⑤ の減圧弁によって調整され、絞り流量計 ⑥ およびガスメーター ⑦ で計量されて混合室 ⑧ に送られ、そこで空気と混合し、ふたたびガスメーター ⑨ を通って燃焼器 ⑩ に導びかれ燃焼する。なお、燃焼器は粉末燐青銅の焼結多孔板を用いて図-3の如く作成し焼結多孔平板より混合気を噴出させ、その平板上に平坦火焰を作らせたもので、多孔平板が低温壁として働く。なお、多孔平板の中央表面にはアルメル・クロメル熱電対 ⑪ (0.3 mmφ) を埋め込み、冷却水量を変えて ⑯、低温壁をある温度範囲内で調整できるようにしてある。この

際、燃焼器の金属多孔平板以外の露出部分はすべて黒色にして、できるだけ輻射を防ぐように留意した。

かかる実験装置において、空気流量、燃料流量すなわち空燃比 ($MR = 28 \sim 40$)、混合気流量 ($Q_m = 10 \sim 30 \text{ lt/min}$) および壁面温度 ($t_w = 15^\circ \sim 80^\circ\text{C}$) を変えながら、火炎の浮き上り (h_d)、火炎の厚さ (h_f) を手製の読取望遠鏡^⑫で、火炎温度分布は白金-白金ロジウム熱電対^⑭および三次元微動移動装置^⑬を用いて、火炎形状はスケッチおよび写真撮影によって測定および記録した。なお、混合気に点火しない場合の流速分布は図-4に示すように燃焼器の構造上、両側の流速が低く、それにつれて温度も低いので温度の代表値としては中央の3点の平均値を採用し、流速を用いる代りに流量を測定した。

次に横風の影響を調べる目的で、図-1(b)および図-2(b)に示すような装置を準備した。すなわち、ルーツブロウ^⑳タンク^⑲ ($100 \times 100 \times 150 \text{ cm}$)、熱風発生機^⑳をとおして焼結合金の多孔板から層流状態として風を吹き付けた。その流速は、サーミスタ流速計^㉑を用いて測定した(燃焼器より上流7 cm の場所)。

なお、使用せる市販プロパンガス (L.P.G.) の組成は次の通りである。

	(mol %)	(wt %)
プロパン	76.6	72.7
イソブタン	13.4	16.8
プロピレン	4.6	4.2
正ブタン	2.6	2.6
エタン	0.5	0.3
ブチレン	2.8	3.4
平均分子量	2.8	

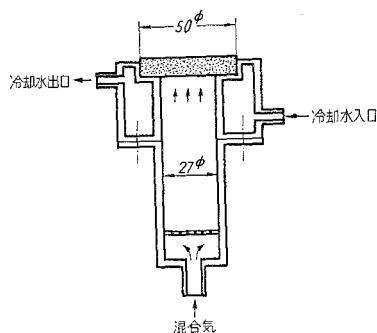


図-3 燃焼器の構造

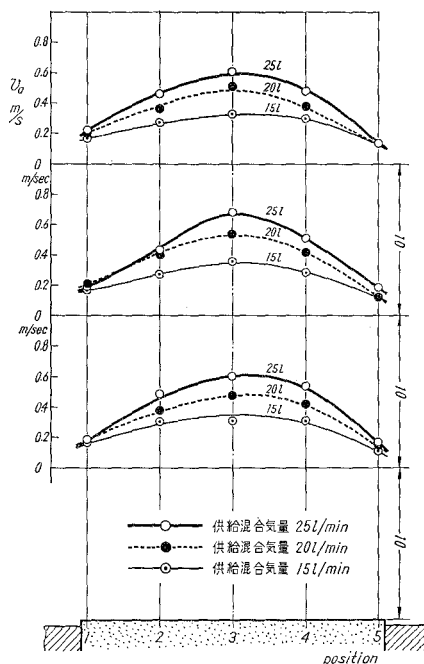


図-4(a) 流速分布

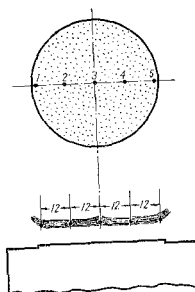


図-4(b) 火炎温度分布測定点

III. 実験結果および考察

III-1 壁面の影響

低温壁面近傍の未燃層の例として、低温壁面から混合気を吹き出しそこに点火して火炎を作るとき、壁面と火炎前面の間の層（火炎の浮き上り）ができる。この層の厚さに関する山崎氏²⁾や西脇氏³⁾らの研究があるが、いずれも図-5のような燃焼火炎（温度分布）の模型を想定し、エネルギー式、連続の式およびアウレニウスの反応式から出発している。その結果、西脇氏らは

$$\frac{C_p \cdot m \cdot h_i}{\lambda} = \ln \left\{ \frac{q - C_p(T_f - T_i)}{q - C_p(T_f - T_w)} \right\} \quad (1)$$

の関係を与えている。ここに m : 重量流量 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)、 T_f : 火炎温度、 T_i : 燃焼開始温度、 T_w : 壁面温度、 q : 混合気の発熱量 (Kcal/kg)、 λ : 熱伝導率 ($\text{Kcal}/\text{m}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$)、 C_p : 比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)、 h_i : 浮き上り (m) である。しかも $T_f = T_i$ とした近似式が $t_w = 50^\circ \sim 150^\circ\text{C}$ 、 $t_f = 1000 \sim 1600^\circ\text{C}$ の範囲の実験値とよく合うことを示すとともに 1) 流量 (m) は大きな影響をもち、混合比が同じとき m の増大にともなって h_i は減少する。2) 実験の範囲での壁温の変化はほとんど影響しないと結論している。

本実験範囲 ($t_w = 15 \sim 90^\circ\text{C}$ 、 $t_f = 1000 \sim 1150^\circ\text{C}$) においては、火炎の浮き上り (h_i) が $h_i = 0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$ の範囲に散在しているものの、西脇氏らの場合と同様に壁温の影響をほとんど受けていない（図-6 参照）。かかる現象は火炎温度 (t_f) も変化しないので、(1) 式の結論と必ずしも一致しない。しかし、壁温が上昇すると冷却壁の吸熱量が減少するので燃焼速度は増加し、

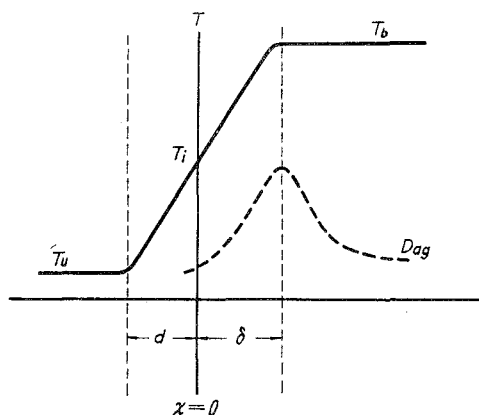


図-5 火炎の温度分布

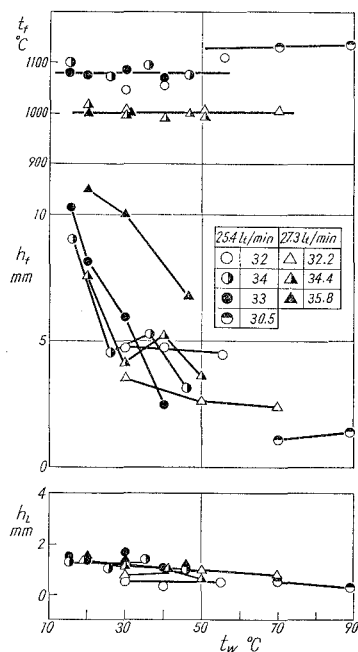


図-6 火焰状態と壁温

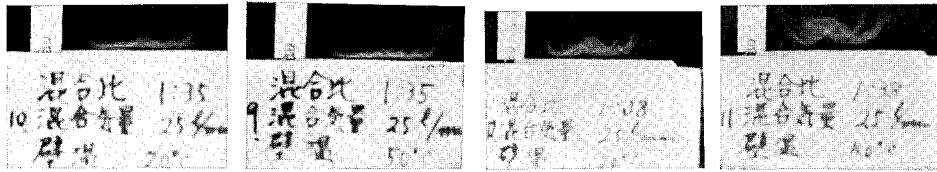


図-7 火焰写真 (壁温の影響)

火炎厚さ (h_f) が混合気の流出速度に近づくためであろう。したがって、完全なフラット・フレイムでないかぎり火炎の厚さ ($h_f = 2 \sim 10 \text{ mm}$) が存在するので $T_f = T_w$ (または $h_f \neq 0$) と近似するわけにはいかない。このように、燃焼火炎と未燃層の厚さに対して壁面温度がほとんど関与しないという実験的事実は、公害対策として未燃層の縮小を計画するうえからも困難な問題をなげかけていると云わざるを得ない。なお、図-7の火炎写真によると、火炎はいずれもブルー・フレイムを呈しているが、混合比が大きく、不安定な燃焼状態にある場合には、壁面温度の影響があらわれているようである。

III-2 混合気流量の影響

いま、(1)式によると混合気の発熱量 (q)、火炎温度 (T_f)、壁面温度 (T_w)、熱伝導度 (λ)、比熱 (C_p) などが等しい場合には火炎の浮き上り (h_i) は重量流量 ($\text{kg/m}^2\text{s}$) に直線的に逆比例することになる。ここでは火炎全般に注目し、混合気流量 (Q_m) の影響を調べた。すなわち、燃焼用空気とプロパンガスとの混合割合を一定とし、混合気流量を $Q_m = 10 \sim 30 \text{ lt/min}$ の範囲に変えた場合の実験結果 (火炎の浮き上り h_i 、火炎厚さ h_f 、および火炎温度 t_f) を図-8に、火炎写真を図-9に示す。

図によると、混合気流量 (Q_m) が増加すると火炎の浮き上り (h_i) は短くなり、 $Q_m = 15 \text{ lt/min}$ において最少値を示し、完全なフラット・フレイムを呈する (図-9(a)および(d))。さらに混合気流量が多くなると、火炎の浮き上り (h_i) および火炎厚

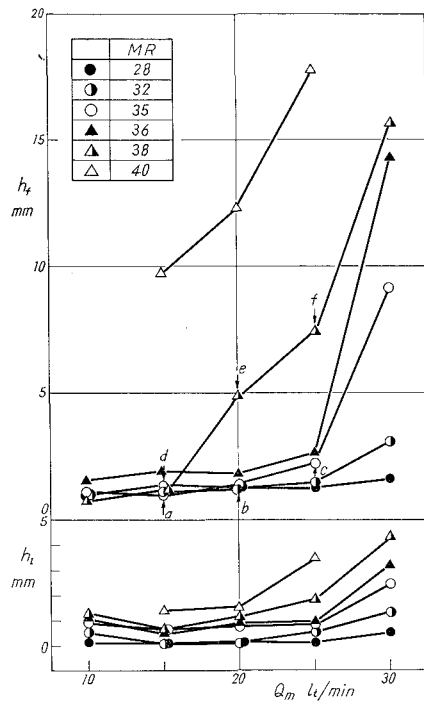


図-8(a) 火焰状態と混合気流量

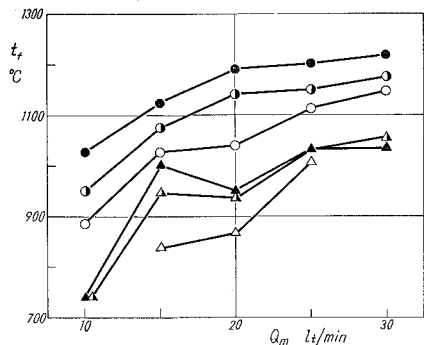


図-8(b) 火焰状態と混合気流量

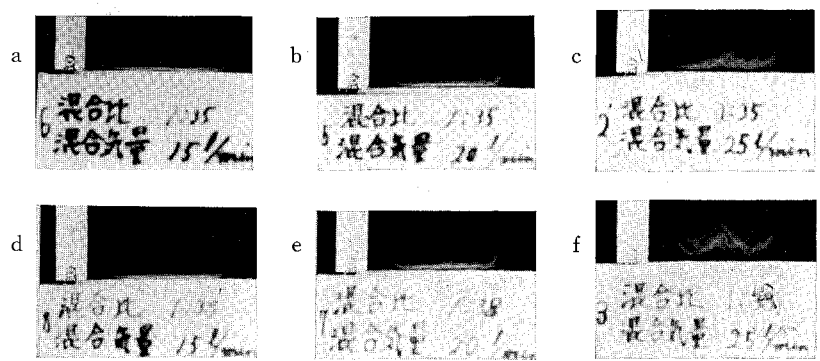


図-9 火 焰 写 真 (混合気流量の影響)

さ (h_f) は増加し、火炎上面に不安定な突起火炎が生じ (図-9 (b) および (e)), $Q_m=25 \text{ lt/min}$ ともなると不安定な W 字型火炎となる (図-9 (c) および (f))。この傾向は混合比 (MR) が大きいほど顕著であり, $MR=40$ の場合には, 燃焼可能な混合気流量には上限と下限があることがわかる。これわ, 反応帯に入る混合気流量が大きい場合には, 混合気の燃焼速度よりも混合気流速が大きいので火炎は浮き上り, 不安定となり, 吹き消えを生ずる。しかし, 混合気流速が低下するにつれて燃焼速度に近づき, 火炎を順次壁面に近づいてきれいなフラット・フレイムを呈する。これが, さらに小さくなると壁面の冷却作用が助長され, 火炎は壁面から離れて消炎してしま

うためであろう。なお, 本実験においては, (1) 式のように火炎の浮き上り (h_f) が混合気流量に逆比例するようなことは認められず $Q_m=10 \sim 20 \text{ lt/min}$ ($v_a=0.2 \sim 0.5 \text{ m/s}$) の範囲では火炎は安定し, 火炎の浮き上り (h_f) もほぼ一定のようであった。これは, 火炎温度 (t_f) が混合気流量 (Q_m) に比例して増加するためではなかろうか (図-8 (b))。

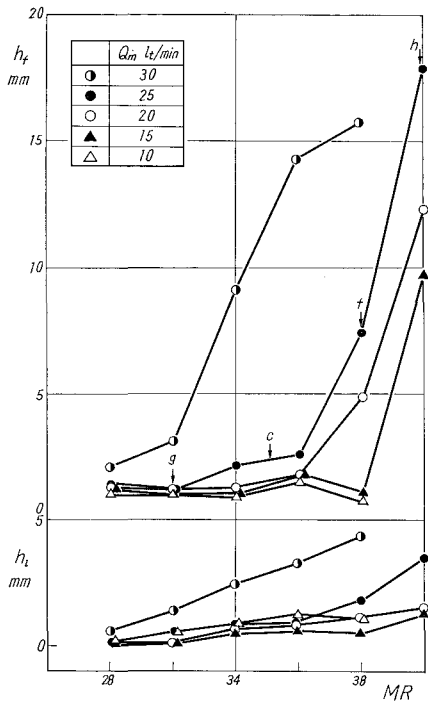


図-10 (a) 燃焼状態と混合比

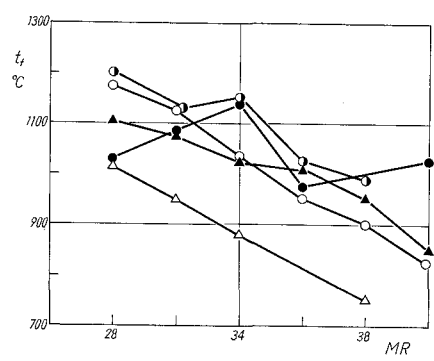


図-10 (b) 燃焼状態と混合比

III-3 混合比 (MR) の影響

同一混合気流量の場合でも、混合比 (MR) によって混合気の発熱量 (q) が変わるの、燃焼速度、火炎温度および火炎の浮き上りにも影響するであろう。しか

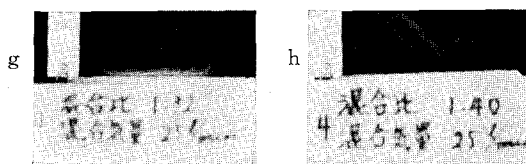


図-11 火焰写真 (混合比の影響)

し、かかる混合比 (MR) の影響を明らかにした実験結果が見当らないので、本実験においては混合比 (MR) を 28~40 の範囲に変えて行った。

その結果を図-10 に、火炎写真を図-11 に示す。いずれの場合も、混合比が大きくなるほど混合気の発熱量 (q) は減少するので、燃焼速度や火炎温度は低下する (図-10 参照)。このため、混合気の流速が燃焼速度よりも大きくなり、火炎の浮き上り (h_i) や火炎の厚さ (h_f) も増加している。この際、火炎形状は、混合比 $MR=32$ の場合 (図-11 (g)) はフラット・フレームから乱れはじめているが、これが $MR=35$ (図-9 (c)) になると両端と中央の火炎がもち上り、 $MR=38$ (図-9 (f)) になるとこの傾向がさらに顕著となり、不安定ではあるが W 字型火炎となる。このため、火炎の浮き上り (h_i) や火炎の厚さ (h_f) が著じるしく増大する。これが $MR=40$ (図-11 (h)) ともなると振動をともなった V 字型火炎に移行し、やがて吹き消えを生ずる。

このように、固体壁面近傍における火炎に影響するのは、主として混合気流量 (Q_m) と混合比 (MR) であることが確認された。

III-4 横風の影響

噴流火炎におよぼす横風の影響に関しては A. Putnam⁴⁾ や服部⁵⁾ の研究が見受けられるが、多孔質金属板上の火炎についての報告は見受けられない。そこで、図-1 および図-2 に示したような多孔質金属板上の火炎に、同じく多孔質金属板を通した横風をあて、火炎の浮き上り (h_i)、火炎厚さ (h_f) および火炎の片寄り (l) を求めた。その結果を図-12、図-13 および図-14 に火炎写真を図-15 に示す。図において、火炎の浮き上り (h_i) すなわち未然層の厚さは、火炎が吹き消える横風流速になっても、ほとんど変化しない。しかし、混合気流量 (Q_m) および混合比 (MR) が大きい場合には火炎の厚さ (h_f) は横風流速 (v_a) に比例して増加する。これは図-15 に示すように、横風によって火炎に片寄りを生ずるためである (図-15 (i), (j), (k) 参照)。かかる傾向は混合気流量 (Q_m) が小さい場合 ($Q_m=20, 15 \text{ l/min}$) には認められず、逆に火炎厚さ (h_f) が短縮している。これに対し、片寄り長さ (l) は横風流速 (v_a) に比例して増加し、火炎は不安定となり、ついに吹き消えを生ずる。しかも、混合比 (MR) が大きく火炎が不安定である場合ほど、片寄り長さ (l) の増加は顕著であり、火炎が吹き消えするときの横風流速 (v_a) は混合比 (MR) が大きいほど、混合気流量 (Q_m) が小さいほど低い値を示すことがわかる。すなわち、多孔質バーナーによる予混合火炎の吹き消え限界は混合比 (MR) と混合気流量 (Q_m) の関数として与えられる。これは、円管バーナーによる予混合火炎の吹き飛び現象や吹き消え現象に対す

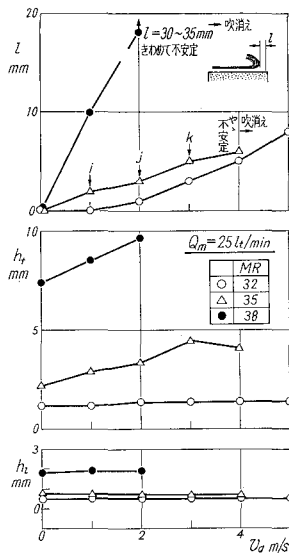


図-12 火焰状態と横風
($Q_m = 25 \text{ lt/min}$)

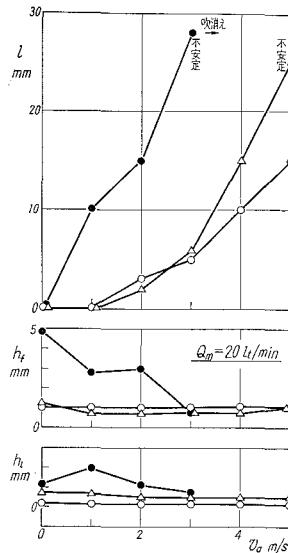


図-13 火焰状態と横風
($Q_m = 20 \text{ lt/min}$)

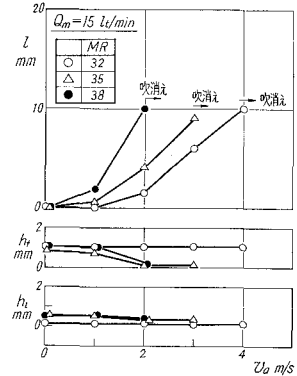


図-14 火焰状態と横風
($Q_m = 15 \text{ lt/min}$)

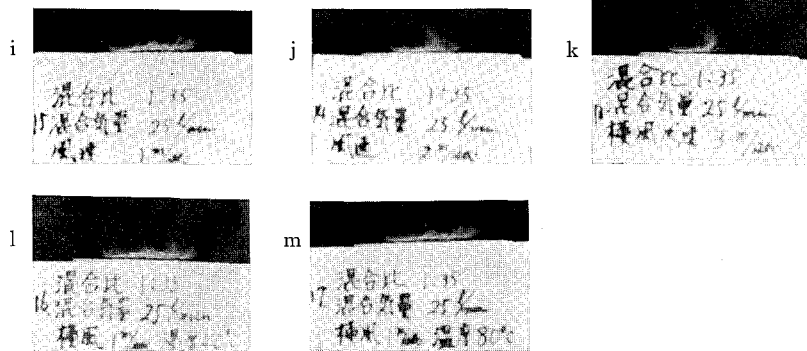
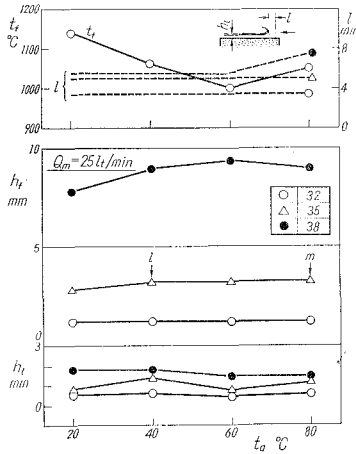
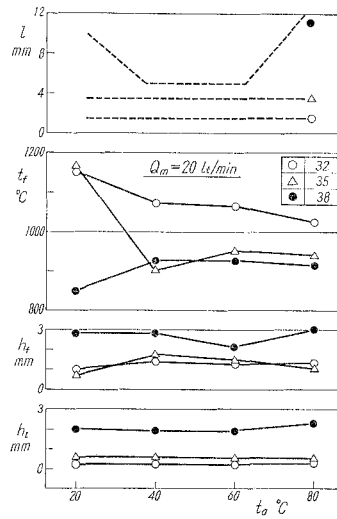


図-15 火焰写真 (横風流速温度の影響)

る場合と全く同じであるが、火炎形状の変化は服部氏の研究とはかなり様相を異にしており、壁面の影響が明らかに認められる。

次に、横風の空気温度 (t_a) を室温 (0°C) から 80°C まで上げて、同じ実験を繰り返した。その結果を図-16および図-17に示す。図によると、横風の空気温度 (t_a) を本実験範囲の程度に変えても、火炎の浮き上り (h_i)、火炎の厚さ (h_f) および火炎形状 (図-15 (i), (l), (m) の比較) にもほとんど変化が認められなかった。


 図-16 火焰状態と横風の温度
($Q_m = 25 \text{ lt/min}$)

 図-17 火焰状態と横風温度
($Q_m = 20 \text{ lt/min}$)

IV. 結 言

以上、多孔質金属平板上に保持された層流予混合火炎の特性および構造におよぼす壁温度 (t_w)、混合気流量 (Q_m)、混合比 (MR) および横風の影響について考察したが、要約すると次のとおりである。

1) 火炎の浮き上り (未燃層の厚さ) は壁面温度や横風流速、横風温度の影響をほとんど受けず、主として混合気流量 (Q_m) および混合比 (MR) に比例して増加し、火炎は不安定となる。なお厳密には、火炎の浮き上り (h_f) が最少になる混合気流量 (Q_m) が存在する。かかる結論は西脇氏の結論と必ずしも一致しない。

2) 火炎の厚さ (h_f) は、壁温に逆比例し、混合気流量 (Q_m)、混合比 (MR) および横風流速 (v_a) に比例して増大し、火炎は不安定となる。

3) 火炎温度 (t_f) は壁温に左右されないが、混合気流量 (Q_m) に比例し、混合比 (MR) に逆比例する。しかし、火炎形状が変化するにつれて測定場所の影響が大きくなり、一貫した傾向は求められなくなる。

4) 火炎の形状は主として混合気流量 (Q_m) と混合比 (MR) に支配され、混合気流量または混合比をふやしていくと、火炎はフラット・フレイムから突起火炎、W 字型火炎および V 字型火炎、さらには吹き消えと移行する。

5) 火炎の吹き消えは主として、混合気流量 (Q_m)、混合比 (MR) および横風流速 (v_a) に左右される。火炎が不安定となりやがて吹き消えを生ずるときの横風流速は混合気流量が小さい

ほど、混合比が大きいほど低くなり、火炎の安定範囲はせまくなる。この際、横風流速はほとんど影響しない。

終りにのぞみ、日頃御指導頂いている東京大学宇宙航空研究所浅沼強教授、北海道工業大学黒岩保教授、北海道大学深沢正一教授、実験装置の製作を担当した本学機械工学科熱工学講座福島和俊教官、早川友吉技官および本実験を卒業研究として担当された高橋宏（室蘭工大大学院）、長船仁彦（小松インター K.K.）の両君に感謝の意を表する。

（昭和 43 年 4 月 30 日受理）

文 献

- 1) 柘植：機械学会講演文集, No. 186, 71.
- 2) 山崎：機械学会誌, 60 巻 465 号 (昭 32-10), 1106.
- 3) 西脇：機械学会 751 回講演会前刷集 (昭 41-3), 37.
- 4) A. Putnam: 10th Symposium on combustion, 1965, 1039.
- 5) 服部：機械学会論文集, 31 巻 221 号 (昭 40-1), 159.